

Aldina Piedade<sup>1</sup>, José Luís Zêzere<sup>1</sup>, José António Tenedório<sup>2</sup>, Ricardo A. C. Garcia<sup>1</sup>, Sérgio Cruz de Oliveira<sup>1</sup>, Jorge Rocha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudos Geográficos. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa

<sup>2</sup> e-Geo. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas. Universidade Nova de Lisboa

## MODELAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA DA AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NA ÁREA AMOSTRA DE LOUSA-LOURES (REGIÃO A NORTE DE LISBOA)

### 1. INTRODUÇÃO

A avaliação da susceptibilidade a movimentos de vertente baseia-se no princípio de que os factores que condicionaram a actividade de deslizamentos no passado e presente serão igualmente responsáveis pela ocorrência dos futuros episódios de instabilidade geomorfológica. A metodologia utilizada neste trabalho teve por base duas questões de partida: i) sendo conhecida a variação espacial da susceptibilidade de uma área é viável a aplicação directa dos *scores* de susceptibilidade correspondentes em áreas que apresentem características geológicas e geomorfológicas similares? ii) qual é o grau de erro introduzido por esta abordagem em comparação com a avaliação de susceptibilidade mais habitual, baseada na exploração do inventário de movimentos de vertente da *área teste*?

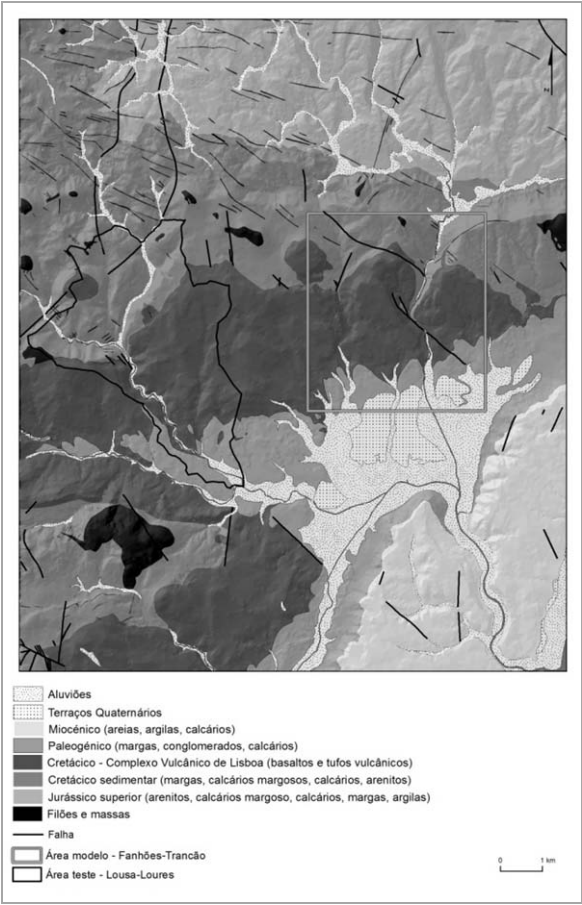
A aplicação e validação de um modelo de susceptibilidade na área de Lousa-Loures (*área teste*) com recurso a algoritmos obtidos para a área de Fanhões-Trancão (*área modelo*), justifica-se pelo facto destas áreas terem características geológicas e geomorfológicas similares e pela existência da mesma tipologia de deslizamentos, nomeadamente os deslizamentos translacionais superficiais. Paralelamente, é desenvolvida a avaliação da susceptibilidade na área de Lousa-Loures, com recurso ao inventário de deslizamentos translacionais superficiais dessa área. Foram criadas e utilizadas bases de dados relacionais que transcrevem as relações entre os factores de predisposição da instabilidade e os deslizamentos translacionais superficiais, com recurso à modelação através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Para possibilitar as comparações, procedeu-se à homogeneização dos dados de partida nas duas áreas e utilizou-se uma única ferramenta estatística para avaliar a susceptibilidade: o Método do Valor Informativo. Os resultados obtidos são validados através de técnicas standardizadas, descritas na literatura especializada (*e.g.* Chung e Fabbri, 2003; Guzzetti, 2005) e já aplicados em estudos similares na região a norte de Lisboa (*e.g.* Reis *et al.*, 2003; Zêzere *et al.*, 2004).

### 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A *área teste* de Lousa-Loures abrange uma superfície de 17km<sup>2</sup> e insere-se na região a Norte de Lisboa (Fig. 1). É drenada pelo Rio de Loures e seus afluentes, que se integram na

bacia hidrográfica do Rio Trancão. Esta área é marcada pela presença de rochas de diferentes dureza, permeabilidade e plasticidade, que, juntamente com uma disposição monoclinal com pendores fracos a moderados (8° a 30°) para SSE e SE, levou ao desenvolvimento de relevos de costeira (Ferreira, 1984). Do ponto de vista litológico destacam-se os materiais do Complexo Vulcânico de Lisboa (47% da área total) e as rochas sedimentares do Cretácico (calcários, arenitos, calcários margosos, pelitos e dolomitos) (38% da área total).

Figura 1 – Geologia da região a Norte de Lisboa e localização das áreas de Lousa-Loures e de Fanhões-Trancão



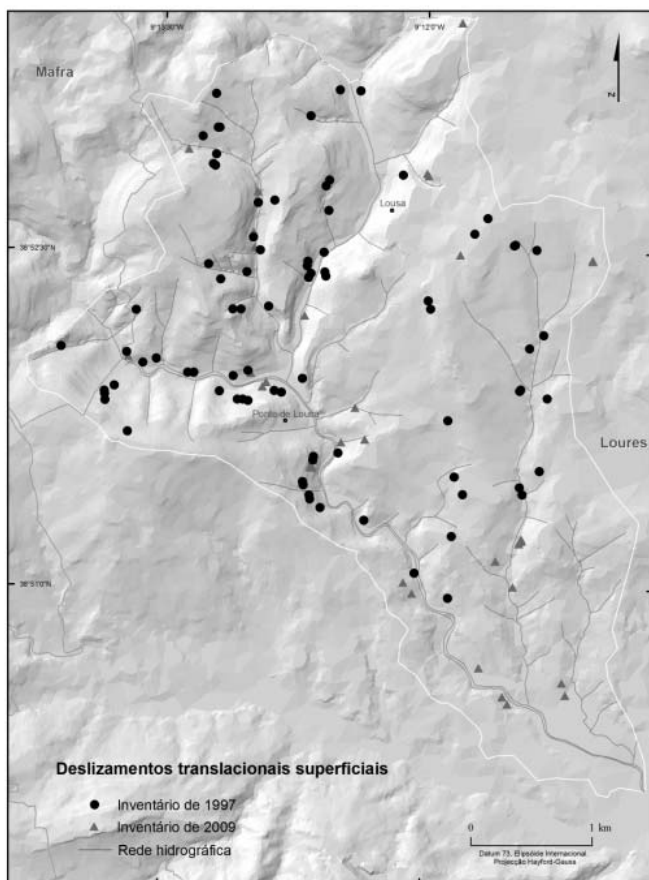
A *área modelo* de Fanhões-Trancão insere-se no sector intermédio da bacia hidrográfica do Rio Trancão, sendo também parte integrante da costeira de Lousa-Bucelas (Fig. 1). Localiza-se no reverso deste relevo estrutural, que acompanha a estrutura monoclinal com inclinação de 12° para S (Zêzere *et al.*, 1999; Reis *et al.*, 2003). A exemplo do verificado na área de Lousa-Loures, do ponto de vista litológico destacam-se os afloramentos do Complexo Vulcânico de Lisboa (49% da área total) e as rochas sedimentares de idade cretácica (calcários, arenitos, calcários margosos) (25% da área total).

### 3. MOVIMENTOS DE VERTENTE E FACTORES DE PREDISPOSIÇÃO

Os deslizamentos são o tipo de movimento de vertente analisado neste trabalho. De acordo com a WP/WLI (1993), um deslizamento é um movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de ruptura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial. O tipo de ruptura tangencial e as características do material afectado constituem os principais critérios para a subdivisão dos deslizamentos, em rotacionais e translacionais. Adicionalmente, o termo superficial é utilizado quando a deslocação do material não afecta o substrato rochoso, ocorrendo apenas no depósito que regulariza as vertentes e que apresenta uma espessura tipicamente compreendida entre os 0,5 e 2 m. Na área de estudo os deslizamentos translacionais superficiais estão relacionados, muitas vezes, com a abertura de taludes antrópicos e com a erosão lateral dos cursos de água.

541

Figura 2 – Distribuição dos deslizamentos translacionais superficiais na área de Lousa-Loures (representados por símbolos adimensionais).



A base de dados dos deslizamentos translacionais superficiais consiste em dois inventários, obtidos através de levantamento de campo (Fig. 2). O primeiro foi efectuado em 1997 (Zêzere, 1997) e integra 82 deslizamentos a que correspondem 37 099 m<sup>2</sup> de área deslizada. O segundo inventário foi efectuado em 2009 e inclui 36 deslizamentos (ocorridos após 1997), com uma área total instabilizada de 6 294 m<sup>2</sup>.

Os factores de predisposição da instabilidade geomorfológica assumidos como capazes de prever a distribuição espacial dos deslizamentos e usados na avaliação da susceptibilidade foram seleccionados tendo como referência os estudos já realizados na *área modelo* de Fanhões-Trancão (*e.g.*, Reis *et al.*, 2003; Zêzere *et al.*, 2004). Assim, foram considerados o declive, a exposição das vertentes, o perfil transversal das vertentes, as unidades litológicas, os depósitos superficiais, as unidades geomorfológicas e o uso do solo, que constituem as variáveis independentes dos modelos. As classes que ocorrem numa única área não foram consideradas no processo de transferência dos *scores* de susceptibilidade da área de Fanhões-Trancão para a área de Lousa-Loures.

#### 4. METODOLOGIA

Partiu-se do conhecimento da instabilidade geomorfológica previamente adquirido para a área de Fanhões-Trancão para definir a susceptibilidade a deslizamentos translacionais superficiais na área de Lousa-Loures. O pressuposto de partida é que os futuros movimentos de vertente têm maior probabilidade de ocorrer sob condições geológicas e geomorfológicas idênticas às que determinaram a instabilidade presente e passada, bem como, que as mesmas causas são susceptíveis de originar os mesmos efeitos. Neste sentido, a avaliação da susceptibilidade na *área teste* é efectuada através da importação de *scores* de susceptibilidade obtidos para a *área modelo*.

Numa segunda abordagem, a disponibilidade de um inventário dos deslizamentos para a área de Lousa-Loures permitiu o cálculo de índices de susceptibilidade com base nos dados da *área teste*, com o objectivo de comparar e discutir os resultados.

Na avaliação da susceptibilidade utilizou-se o método estatístico bivariado do Valor Informativo (Yin e Yan, 1988). Esta técnica descreve quantitativamente, sob a forma de *scores*, as relações existentes entre cada uma das classes de cada variável e os movimentos de vertente. O método pressupõe a definição prévia da unidade de terreno (aqui assumida como pixel, com uma resolução de 5x5 m) e um conjunto de factores de instabilidade (classes de cada variável), sendo os respectivos Valores Informativos determinados a partir da seguinte equação (Yin e Yan, 1988):

$$Ii = \frac{Si / Ni}{S / N} \quad [1]$$

em que:  $Ii$  é o Valor Informativo da variável  $i$ ;  $Si$  é o número de *pixels* com movimentos de tipo  $y$  e com presença da variável  $i$ ;  $Ni$  é o número de *pixels* com a presença da variável  $i$ ;  $S$  é o número total de *pixels* com movimentos de vertente tipo  $y$ ; e  $N$  é o número de *pixels* na área de estudo.

O Valor Informativo total para cada unidade de terreno é definido pela seguinte expressão:

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} \cdot I_i \quad [2]$$

543

em que:  $I_i$  é o Valor Informativo do pixel  $j$ ;  $n$  é o número de variáveis;  $X_{ji}$  corresponde a 0, se a variável não está presente no pixel  $j$ , e 1 na situação contrária.

Esta metodologia permite a obtenção de *scores* de susceptibilidade, mesmo de unidades de terreno que ainda não foram afectados por movimentos. Na aplicação do método, cada factor de instabilidade é cruzado com a distribuição dos movimentos de vertente, daí resultando os *scores* para cada classe de cada variável.

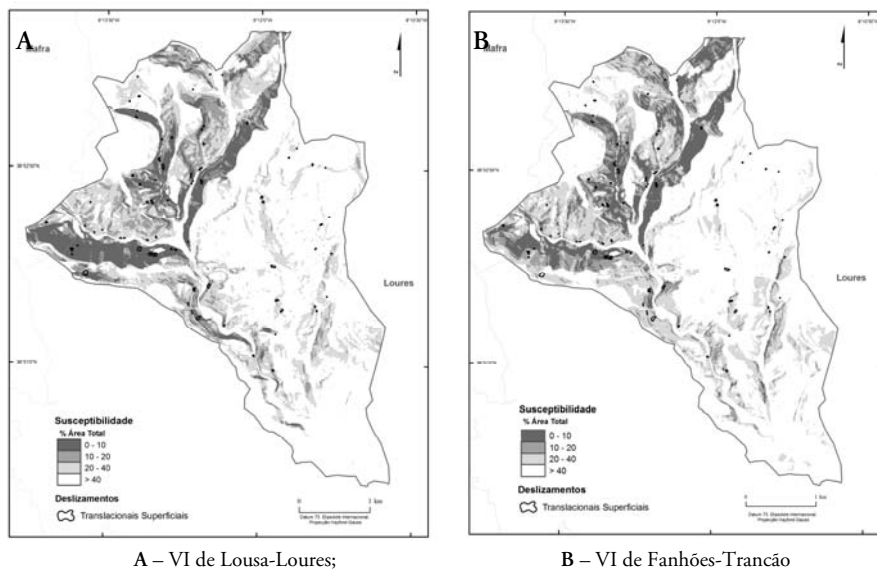
A validação dos resultados é sustentada pelo cruzamento dos mapas de susceptibilidade com a distribuição dos deslizamentos translacionais superficiais. O grau de ajuste entre os dados e o modelo é determinado através do cálculo da taxa de sucesso (o mapa de susceptibilidade é cruzado e validado com os movimentos de vertente que lhe deram origem) e a respectiva capacidade preditiva através da taxa de predição (o mapa de susceptibilidade é cruzado e validado com uma amostra de movimentos de vertente independente, não considerada na construção do modelo preditivo). A aferição da capacidade preditiva do modelo de susceptibilidade foi possível através da partição temporal dos dados de instabilidades, sustentada num novo inventário obtido em 2009, e que foi usado para a validação do modelo construído com base nos deslizamentos translacionais superficiais inventariados em 1997. A qualidade global dos mapas de susceptibilidade foi avaliada através do cálculo da Área Abaixo da Curva (AAC), resultante da representação gráfica das taxas de sucesso e predição.

## 5. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS SUPERFICIAIS

A observação dos mapas de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais (Fig. 3) permite concluir que estes são bastantes parecidos, sendo que as classes de susceptibilidade mais elevadas localizam-se em áreas com características naturais similares, nomeadamente nas vertentes com declive mais acentuado, nas áreas de anverso de costeira e na unidade litológica correspondente às margas e calcários margosos. A mancha com maior expressão territorial corresponde às áreas com menor susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais, caracterizando-se por vertentes de declives suaves e talhadas em basaltos, tufos vulcânicos, conglomerados e arenitos

O ajuste dos mapas A e B pode ser expresso pela taxa de concordância (%) das classes de susceptibilidade. Se considerarmos os primeiros 5% de área classificada como mais susceptível, verificamos que há uma concordância de 43% entre os dois mapas. Esse valor aumenta para 56% quando se comparam os 10% de área classificada como mais propensa à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais.

Figura 3 – Mapas de susceptibilidade a deslizamentos translacionais superficiais na área de Lousa-Loures



## 6. VALIDAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE: CURVAS DE SUCESSO E PREDIÇÃO

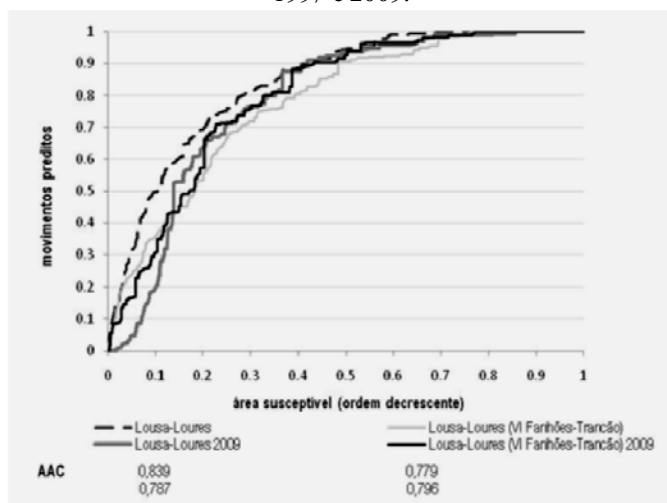
A figura 4 apresenta as curvas de sucesso (tracejado) e de predição (cinza claro), e as respectivas Áreas Abaixo da Curva (AAC), respeitantes aos dois modelos de susceptibilidade representados na figura 3. O modelo obtido com os movimentos de Lousa-Loures apresenta uma AAC superior à obtida para a *área teste* com os Valores Informativos de Fanhões-Trancão, (0,839 e 0,779, respectivamente). De acordo com o critério de Guzzetti (2005), estes modelos são classificados como “muito bom” e “aceitável”, respectivamente. No entanto, estes dados não são directamente comparáveis, uma vez que o primeiro fornece o grau de ajuste dos dados ao modelo e o segundo a capacidade preditiva do mesmo.

Os valores obtidos com a taxa de predição não se distanciam muito dos da curva de sucesso: aos 10% da área total a validação é de 36% dos movimentos. Com 50% da área de estudo são validados 90% dos deslizamentos translacionais superficiais.

A figura 4 representa ainda as curvas de predição obtidas pela sobreposição dos deslizamentos translacionais inventariados em 2009 na área de Lousa-Loures. Em comparação com a curva de sucesso da área de Lousa-Loures (tracejado) verifica-se que o modelo validado com deslizamentos de 2009 (cinza escuro) fica abaixo da curva de ajuste, como seria expectável tratando-se de uma curva de predição, com AAC de 0,787. O modelo de susceptibilidade produzido com *scores* de VI importados da *área modelo* apresenta uma capacidade preditiva dos movimentos inventariados em 2009 ligeiramente superior comparativamente ao anterior, com uma AAC de 0,796. Este facto pode estar relacionado com a sub-dimensão da amostra de deslizamentos translacionais superficiais (36) e com a área deslizada reduzida (6 294 m<sup>2</sup>), que foi utilizada para a validação. Por outro lado, sendo conhecido que o factor de predisposição “declive” tem um papel determinante na ocorrência desta tipologia de

movimentos, calculou-se o VI para essa variável com os deslizamentos translacionais superficiais do inventário de 2009. Os valores obtidos aproximam-se mais dos observados na *área modelo* do que os observados na *área teste*, ou seja, os deslizamentos translacionais superficiais ocorridos na área de Lousa-Loures entre 1997 e 2009 verificaram-se em vertentes com declive mais acentuado, comparativamente ao observado antes de 1997, e mais próximo da situação que caracterizou este tipo de movimentos na área de Fanhões-Trancão, sendo este o principal motivo da obtenção de melhores AAC.

Figura 4 - Curva de sucesso (tracejado), curvas de predição e respectivas AAC dos modelos de susceptibilidade a deslizamentos translacionais superficiais validados com inventários de 1997 e 2009.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos através da exportação de *scores* de susceptibilidade para uma área com características geológicas e geomorfológicas similares, com modelação em SIG, mostram que se trata de uma metodologia válida, tratando-se de movimentos de vertente da mesma tipologia. O pressuposto que as mesmas causas são susceptíveis de gerar os mesmos efeitos, num contexto geológico e geomorfológico similar foi validado pela metodologia desenvolvida. Para tal, em muito contribuíram os procedimentos analíticos sustentados por inventários de movimentos de vertente robustos e pela utilização de um método estatístico simples, mas fiável (Valor Informativo) em ambiente SIG.

Os mapas de susceptibilidade produzidos com *scores* obtidos nas duas áreas de estudo apresentam um elevado nível de concordância; por exemplo, aos 20% de área classificada como mais susceptível a sobreposição entre eles é de 76%.

Os resultados obtidos, para além de confirmarem a viabilidade da aplicação directa de *scores* de susceptibilidade em áreas que apresentem características geológicas e geomorfológicas similares, revelam ainda que o Método do Valor Informativo constitui uma boa escolha

para a atribuição objectiva dos pesos das variáveis e para a integração de dados estatísticos na análise e na modelação espacial.

Em resposta à segunda pergunta de partida, observa-se que grau de incerteza associado a esta abordagem metodológica, em comparação com a avaliação de susceptibilidade mais habitual, baseada na exploração de um inventário de deslizamentos da área de estudo, revelou-se baixo; a diferença entre AAC de curva de sucesso e AAC da curva de predição é apenas de 0,06.

O inventário de movimentos de vertente produzido em 2009 valida os mapas de susceptibilidade, num processo de validação independente de base temporal, confirmando a robustez dos modelos e a sua capacidade para prever a distribuição espacial dos futuros deslizamentos translacionais superficiais.

A metodologia apresentada e respectiva validação constitui um exercício académico de carácter científico. A sua transposição e generalização em Planos de Ordenamento do Território só poderá ser efectuada quando houver disponibilidade de um inventário de instabilidades para a área em estudo que permita validar os mapas de susceptibilidade; só assim se poderá avaliar a capacidade preditiva dos modelos e a sua validação científica. Assim, é desaconselhável a realização de modelos de susceptibilidade nessas circunstâncias, sob pena de se cometerem erros grosseiros que distorcem a realidade, com graves consequências para o ordenamento do território.

Este estudo é parte do Projecto MapRisk (PTDC/GEO/68227/2006) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chung, C. J., Fabbri, A. 2003, 'Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping', *Natural Hazards*, n.º 30, pp 451-472.
- Ferreira, A. B. 1984, 'Mouvements de terrain dans la Région au Nord de Lisbonne. Conditions morphostructurales et climatiques', *Mouvements de Terrain. Colloque de Caen*. Documents du B.R.G.M., n.º 83, pp. 485-494.
- Guzzetti, F. 2005, *Landslide Hazard and Risk Assessment*. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Bona, 371 pp.
- Reis, E., Zêzere, J. L., Vieira, G. T., Rodrigues, M. L. 2003, 'Integração de dados espaciais em SIG para a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos', *Finisterra XXXVIII*: 76, pp 3-34.
- Varnes, D. J. 1978, 'Slope Movement Types and Processes' In SCHUSTER, R. L., KRIZEK, R. J. (eds.), *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board Special Report, 176. Washington D.C..
- Working Party On World Landslide Inventory, Unesco 1993, 'A suggested method for describing the activity of a landslide'. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, n.º 47, pp. 53-57.
- Yin, K. L., Yan, T. Z. 1988, Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. Bonnard, (ed.), *Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, 2, Balkema, Rotterdam, pp. 1269-1272.
- Zêzere, J. L. 1997, *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa, 576 pp.
- Zêzere, J. L., Ferreira, A. B., Rodrigues, M. L. 1999, 'The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon (Portugal)', *Geomorphology*, 1-2 n.º 30, pp. 133-146.
- Zêzere, J. L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M. L., Vieira, Ferreira A. B. 2004, 'Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslides hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal)' *Natural Hazard and Earth System Sciences* n.º 4, pp. 133-146.